

# Localisation 2D d'un mobile sur une carte numérique précise

Ahmed SELLOUM<sup>†</sup>, Eric LE CARPENTIER<sup>‡</sup>, David BÉTAILLE<sup>†</sup>, François PEYRET<sup>†</sup>,

<sup>†</sup>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - Centre de Nantes  
Division Métrologie et instrumentation  
Section Imagerie et géolocalisation  
Route de Bouaye, BP 4129, 44341 Bouguenais Cedex, France

<sup>‡</sup>Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (UMR CNRS 6597)  
Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, CNRS  
1, rue de la Noë, BP 92101, F44321 Nantes Cedex 3, France  
(ahmed.selloum|david.betaille|francois.peyret)@lcpc.fr  
Eric.Le-Carpentier@ircryn.ec-nantes.fr

**Résumé** – On s'intéresse à la localisation (à une précision submétrique) d'un véhicule sur une carte précise, à l'aide d'informations GPS, gyroscopiques et odométriques. Pour le type de carte utilisé, le processus de projection sur la carte (map-matching) est difficile. On propose une modélisation et un algorithme de filtrage bayésien particulière permettant de fusionner en une étape les processus de positionnement et de projection en intégrant directement dans le modèle les données de la carte. En plus, il nous permet d'intégrer les contraintes cartographiques de la route dans le système d'évolution. Le fonctionnement est vérifié en simulation.

**Abstract** –

## 1 introduction

La localisation d'un mobile dans son environnement est réalisée au moyen d'amers, naturels ou artificiels, par rapport auxquels le mobile a un mouvement relatif [1]. En robotique, la vision et la télémétrie laser fournissent de nombreux principes qui sont appliqués le plus souvent en laboratoire, ou dans des contextes expérimentaux particuliers (DARPA Challenge, exploration lunaire...). Ces techniques mettent en correspondance des primitives extraites d'images réelles (images au sens commun du terme mais aussi au sens d'images lidar par exemple) avec leurs homologues référencées dans une base de données, et qui caractérisent l'environnement structuré. Nous nous plaçons dans le contexte des applications du secteur automobile avec pour objectif la localisation du véhicule dans un environnement (les routes, les rues...) avec l'aide de cartes numériques. Cette problématique donne généralement lieu à un premier processus de localisation, suivi d'un second de map-matching. Pour le premier processus, la littérature comprend de très nombreuses références concernant l'hybridation de centrales inertielle et récepteurs GPS, lâche ou serrée [3] [8]. Pour le deuxième processus, différentes techniques ont été répertoriées par [7] parmi lesquelles les plus avancées mettent à profit non seulement la position mais aussi le cap du véhicule [4]. Le tracking de plusieurs hypothèses en parallèle dans la base de données cartographiques par filtrage particulière est montré dans [5]. Ces travaux utilisent des cartes numériques standard représentant les routes par des polygones.

Les investigations rapportées dans cet article se concentreront sur un système de localisation susceptible de répondre à la fois à l'exigence de précision demandée par les systèmes d'aides à la conduite<sup>1</sup> (changement de voie par exemple) et aux contraintes du monde de l'automobile. On propose une méthode bayésienne combinant sous contraintes cartographiques les données d'un GPS naturel, d'un odomètre et d'un gyromètre MEMS. Les informations de la carte sont considérées comme des contraintes du problème, ce qui le rend théoriquement mieux configuré au sens de l'observabilité et peut aussi augmenter la précision de la localisation. Ainsi l'utilisation d'une carte précise est primordiale pour atteindre notre objectif. La carte développée au sein du LCPC présente une originalité dans la modélisation, car les routes ont été cartographiées à la façon des projets de construction : toutes les voies sont représentées et non pas uniquement les chaussées séparées, par des clothoïdes et non des polygones approximant les courbes, et l'exactitude des coordonnées y est submétrique.

D'un point de vue conceptuel, notre technique consiste à faire du tracking dans la carte précise à la manière des techniques s'appuyant sur des bases d'amers ou des bases d'images. Nous identifions ainsi des travaux proches au sens où il y a en même temps tracking d'objets référencés et utilisation de solutions (voire de mesures) GPS, mais technologiquement différents selon comment ces objets sont perçus. Ces travaux concernent toujours l'ajout de mesures extéroceptives à la brique techno-

---

1. Advanced Driver Assistant System (ADAS)

logique : GPS + inertiel. Ainsi, l'ajout du lidar fait l'objet d'intenses activités de recherche particulièrement à l'Université de l'Ohio [11]. La vision en robotique en général, couplée au GPS, est également au centre de nombreux travaux, dans des projets tels CityVIP en France, ou connexes [6] [9] [10].

La première partie de cet article porte sur la modélisation cartographique de la route. Ensuite, on développe le modèle dynamique du système et le filtre bayésien proposé. Enfin, on compare les résultats (simulation et expérimentation réelle) obtenus par cette méthode aux résultats obtenus par un EKF et le filtre proposé par [2].

## 2 Modélisation 2D de la route

Pour obtenir une représentation de la route plus précise que la représentation des cartes actuelles, nous allons supposer que la carte est représentée géométriquement à la manière d'un projet routier. Chaque voie de circulation est représentée par un ou plusieurs éléments géométriques, de type : ligne droite, virage ou zone de transition. On peut décrire tous ces éléments par une clothoïde  $m$  dont l'équation obéit à la formulation intégrale suivante, où  $\ell$  est l'abscisse curviligne du point  $(x^m, y^m)$  (cf. figure 1) :

$$\begin{cases} x^m(\ell) = x_0^m + \int_0^\ell \cos(\tau^m(s)) ds, & 0 < \ell < L^m \\ y^m(\ell) = y_0^m + \int_0^\ell \sin(\tau^m(s)) ds, & 0 < \ell < L^m \end{cases} \quad (1)$$

où :

$$\tau^m(s) = \tau_0^m + \kappa_0^m s + \frac{c^m s^2}{2}. \quad (2)$$

avec

- $x_0^m$  et  $y_0^m$  les coordonnées du point initial (Est, Nord), pour la clothoïde  $m$ ,
- $\tau_0^m$  l'orientation au point initial par rapport à l'Est,
- $\kappa_0^m$  la courbure au point initial,
- $c^m$  la variation de courbure égale à  $\partial \kappa^m / \partial s$  (constante),  $\kappa^m$  désignant la courbure,
- $L^m$  la longueur totale.

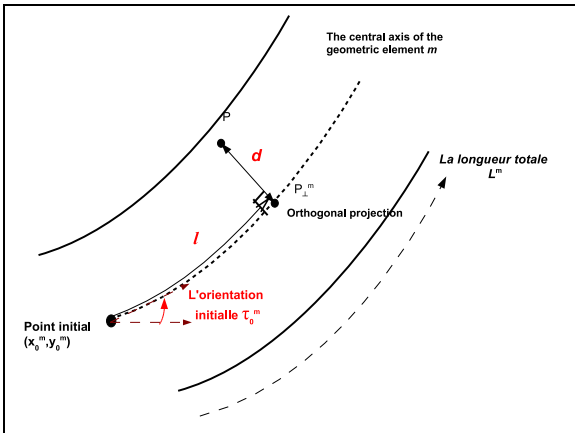


FIGURE 1 – la clothoïde  $m$

Cependant la représentation filaire par éléments courbes, tout comme la représentation par polygones ne suffit pas pour décrire correctement la route. En effet, cette représentation linéique de la route ne peut être utilisée que pour décrire l'axe central de la route. Pourtant, pour les systèmes d'aide à la conduite tels que le Lane Keeping ou l'Auto Cruise Control, il est nécessaire de connaître la position du véhicule par rapport aux voies de circulation. Pour les applications ADAS, la dimension transversale des voies doit aussi être renseignée. Donc, pour chaque élément courbe d'une voie de circulation on suppose que la largeur  $D(\ell)$  varie linéairement le long de cet élément.

Ainsi, tout point  $P$  appartenant à l'élément  $m$  a des coordonnées  $\ell$  et  $d$  relatives à l'élément  $m$  (abscisse curviligne et distance algébrique à l'axe de l'élément) (cf. figure 1), coordonnées dites "de Frenet". L'abscisse curviligne  $\ell$  est la solution du problème de minimisation suivant :

$$\begin{cases} \text{minimiser } \|(x, y) - (x^m(\ell), y^m(\ell))\| \\ \ell \in [0, L^m] \end{cases} \quad (3)$$

La distance latérale  $d$  est calculée selon la formule suivante :

$$d = \|(x, y) - (x^m(\ell), y^m(\ell))\| \quad (4)$$

Notons que  $d$  positive si le véhicule se trouve sur la partie droite de l'élément lorsqu'on le parcourt dans le sens de circulation. Après avoir déterminé tous les éléments géométriques qui constituent la route, on crée un graphe de connexion entre ces éléments. Pour ça, des liens topologiques entre éléments géométriques sont introduits selon [2], mais leurs auteurs ne considéraient pas les cas de dépassement sur voie de circulation opposée et n'avaient pas besoin de connaître la position relative des éléments topologiquement liés. Dans notre application, pour chaque élément  $m$  de la carte, on distingue quatre types de voisins : en face, précédent, droite et gauche. Enfin, pour positionner chaque élément voisin  $v$  par rapport à l'élément  $m$ , on introduit dans la base de données des attributs qui correspondent aux coordonnées de Frenet de deux extrémités de l'axe de l'élément  $v$  dans la référence associée à  $m$ . Ainsi, on crée un graphe décrivant la nature de lien entre les éléments géométriques et le positionnement relatif entre eux. En plus, on utilisera les attributs associés aux voisins droite et gauche de l'élément  $m$  pour calculer localement sa largeur. En effet, en supposant que la largeur d'un élément est une fonction linéaire par morceaux selon l'abscisse curviligne  $\ell$ , alors les attributs associés aux voisins droite et gauche seront considérés comme des conditions initiales de cette fonction. Enfin, ces informations topologiques intégrées dans la base de données de la carte nous seront utiles comme des informations à priori dans la procédure du positionnement du véhicule.

## 3 Modélisation du système dynamique

De façon classique quand on utilise un véhicule équipé d'odomètre et de gyromètre, on calcule l'évolution dans un repère

Est-Nord local. Dans la mesure où on observe directement la position par GPS, celle-ci sera convertie du WGS 84 au repère Est-Nord local. Une fois la localisation établie, il convient d'utiliser le processus du "map-matching" pour positionner le véhicule sur la carte. Cependant, l'utilisation d'une carte précise rend le problème de map-matching (problème de minimisation de distance) impossible à résoudre analytiquement sauf dans des cas particuliers (droite, arc de cercle) ce qui conduit à utiliser une méthode numérique approximative et coûteuse. Dans [12], les auteurs utilisent un vecteur d'état contenant à la fois les coordonnées cartésiennes et les coordonnées de Frenet relatives à l'élément dans le but de ne pas faire un map-matching à chaque instant mais uniquement quand le véhicule change d'éléments géométriques.

Pour éviter l'utilisation de ces méthodes approximatives, on a choisi de manipuler directement l'abscisse curviligne  $l$  le long de la route et l'écart latéral  $d$  sans passer par les coordonnées cartésiennes. On propose un modèle de Markov dans lequel, pour tout instant  $n$ , on a :

- $Z[n]$  le vecteur d'état contenant l'indice  $m[n]$  et une partie continue  $C[n] = [\ell[n], d[n], \psi[n]]$
- $U[n]$  le vecteur d'entrée composé des données odométriques  $\Delta s[n]$  et gyrométriques  $\Delta \psi[n]$  :

$$U[n] = \begin{bmatrix} \Delta s[n] & \Delta \psi[n] \end{bmatrix}. \quad (5)$$

- $Y[n]$  le vecteur de mesure à l'instant  $n$  donné par le GPS :

$$Y[n] = \begin{bmatrix} x^{gps}[n] & y^{gps}[n] \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Un modèle de Markov est caractérisé par les lois, conditionnellement à l'état courant  $Z[n]$ , de l'observation  $Y[n]$  et de l'état suivant  $Z[n+1]$  (loi d'évolution).

On se propose d'implanter un filtre particulaire de type Bootstrap pour reconstruire en ligne l'état  $Z[n]$ . Dans ce filtre, il faut savoir exprimer la densité de la loi d'observation  $P_{Y[n]|Z[n]}$  et savoir simuler suivant la loi d'évolution  $Z[n+1]|Z[n]$ .

Le modèle d'observation est le suivant ; pour tout  $n$  :

$$Y[n] = h(Z[n]) + w^{gps}[n] \quad (7)$$

où  $w^{gps}$  est le bruit additif applicable aux points GPS, supposé gaussien et  $h$  la fonction s'écrivant, pour tout  $z = [m\ell d\psi]$  :

$$h(z) = \begin{bmatrix} x_0^m \\ y_0^m \end{bmatrix} - d \begin{bmatrix} -\sin \tau^m(\ell) \\ \cos \tau^m(\ell) \end{bmatrix} + \int_0^\ell \begin{bmatrix} \cos \tau^m(s) \\ \sin \tau^m(s) \end{bmatrix} ds \quad (8)$$

On obtient donc :

$$P_{Y[n]|Z[n]=z}(y) = P_{w^{gps}[n]}(y - h(z)) \quad (9)$$

Il reste à expliciter la loi d'évolution. Les coordonnées de Frenet  $(\ell[n+1], d[n+1])$  sont définies par rapport à la courbe  $m[n+1]$ , il faut donc déterminer  $m[n+1]$  pour prédire  $(\ell[n+1], d[n+1])$ . Afin de résoudre ce problème, l'idée de base est d'abord de prédire la position du véhicule à l'instant  $n+1$  dans un repère de Frenet intermédiaire associé à l'élément  $m[n]$  "étendu". On note ces coordonnées  $F_{m[n]}^{inter}[n+1] = (\ell^{inter}[n+1], d^{inter}[n+1])$ . Après, en fonction des caractéristiques de

l'élément  $m[n]$  (longueur, largeur, liens topologiques), la procédure de sélection de l'élément  $m[n+1]$  est purement géométrique, et simple à mettre en oeuvre. En pratique, l'évolution de l'état du système entre les instants  $n$  et  $n+1$  s'effectue en 2 temps. Dans un premier temps, on fait l'hypothèse que le véhicule ne quitte pas l'élément  $m[n]$  entre les instants  $n$  et  $n+1$ , alors la loi d'évolution du cap, et des coordonnées de Frenet "intermédiaires" s'exprime, en supposant que le véhicule roule sans glissement (le rayon de courbure du trajectoire est constant) et que la portion de l'axe de l'élément  $m[n]$ , sous l'hypothèse de petit déplacement, sera un arc de cercle de une courbure de  $k^{m[n]}(\ell[n]) = k_0^{m[n]} + c^{m[n]}. \ell[n]$ , de la façon suivante :

$$\psi[n+1] = \psi[n] + \Delta\psi[n+1] + w^\psi[n+1]$$

$$\Delta\tau[n+1] = \arctan \frac{\Delta S[n+1] \cos(\beta)}{\frac{1}{\kappa^{m[n]}(\ell[n])} + d[n] - \Delta S[n+1] \sin(\beta)}$$

$$\ell^{inter}[n+1] = \ell[n] + \frac{\Delta\tau[n+1]}{\kappa^{m[n]}(\ell[n])} + w^\ell[n+1]$$

$$d^{inter}[n+1] = d[n] + \frac{\Delta S[n+1] \sin(\beta - \frac{\Delta\tau[n+1]}{2})}{\cos(\frac{\Delta\tau[n+1]}{2})} + w^d[n+1] \quad (10)$$

avec  $\Delta S[n+1] = \Delta s[n+1] \text{sinc}(\frac{\Delta\psi[n+1]}{2})$ ,  $\beta = \psi[n] + \frac{\Delta\psi[n+1]}{2} - \tau^{m[n]}(\ell[n])$  et  $(w^\psi, w^\ell, w^d)$  sont des bruits blancs additifs qui modélisent les erreurs dues aux approximations. D'une manière intuitive, on peut appliquer des bruits longitudinaux et transversaux plus conforme à la physique du roulement du véhicule que dans le cas où on modéliserait avec les coordonnées cartésiennes. Après avoir exprimé cette loi de *pré-évolution*, on corrige, de façon purement déterministe, les coordonnées de Frenet intermédiaires. En effet, selon ces coordonnées de Frenet intermédiaires et aussi les données caractéristiques de l'élément  $m[n]$  (sa longueur, sa largeur, ses liens topologiques), on distingue 6 cas différents :

- a) **le véhicule ne quitte pas l'élément  $m[n]$ .** Dans ce cas, on a donc :

$$\begin{cases} m[n+1] &= m[n] \\ \ell[n+1] &= \ell^{inter}[n+1] \\ d[n+1] &= d^{inter}[n+1] \end{cases} \quad (11)$$

- b) **le véhicule passe à un voisin droite de  $m[n]$ .** Dans ce cas, sachant que chaque voisins à droite de  $m[n]$  est caractérisé par les quatre attributs de positionnement  $\{(\ell_{Id}, d_{Id}), (\ell_{Ed}, d_{Ed})\}$ . Donc, à l'instant  $n+1$  le véhicule se trouve sur l'élément caractérisé par  $\ell_{Id}$  et  $\ell_{Ed}$  tel que  $\ell_{Id} \leq \ell^{inter}[n+1] \leq \ell_{Ed}$ , notons cet élément  $m_d$ . Ensuite, on suppose que l'élément  $m[n]$  et  $m_{droite}$  ont le même rayon de courbure (on néglige la distance latérale entre eux par rapport au rayon de courbure), on obtient alors :

$$\begin{cases} m[n+1] &= m_d \\ \ell[n+1] &= \ell^{inter}[n+1] - \ell_{Id} \\ d[n+1] &= d^{inter}[n+1] - 2 \cdot D_{droite}^{m[n]}(\ell^{inter}[n+1]) \end{cases} \quad (12)$$

où  $D_{\text{droite}}^{m[n]}(\ell^{inter}[n+1])$  est la largeur de la côte droite de l'élément  $m[n]$  à l'abscisse curviligne  $\ell^{inter}[n+1]$ .

D'une manière analogique on traite les autres cas :

- c) **le véhicule passe à gauche** si  $0 \leq \ell^{inter}[n+1] \leq L^{m[n]}$  et  $d^{inter}[n+1] < D_{\text{gauche}}^{m[n]}(\ell^{inter}[n+1])$ .
- d) **le véhicule passe en face** si  $\ell^{inter}[n+1] \geq L^{m[n]}$ .
- e) **le véhicule passe derrière** si  $\ell^{inter}[n+1] < 0$ .
- f) **le véhicule se trouve en dehors de la route** si par exemple, il y a un dépassement à droite alors que l'élément  $m[n]$  n'a pas de voisin à droite. On considère ce cas comme cas aberrant ce qui nous permet d'introduire les contraintes géographiques sur notre modèle d'évolution.

## 4 Filtrage

Le filtre particulaire se prête bien à une telle formalisation en deux temps du modèle d'évolution avec un état mixte continu-discret. De plus, les non linéarités des modèles seront mieux prises en considération que dans un filtre de Kalman étendu. On a implémenté un algorithme de filtrage particulaire de type "Bootstrap". Après avoir approché pour chaque instant  $n$  la loi **a posteriori** de  $Z[n]$  conditionnellement au passé de l'observation  $\{Y[k], k \leq n\}$  par une nuage de particules, l'élément routier  $\hat{m}[n]$  estimé correspond à l'élément majoritaire parmi les particules, les coordonnées de Frenet  $(\ell[n], d[n])$  sont prises en moyenne sur les particules attachées à cet élément (maximum à posteriori marginal).

## 5 Simulations

Dans cette partie, on teste le comportement de l'algorithme sur des données simulées de la trajectoire du véhicule sur un site de test du projet européen CVIS à Berlin pour lequel on dispose d'une carte précise. Sur la figure 2, on représente la trajectoire de référence du véhicule qui évolue avec une vitesse constante de 50 km/h sur une longueur de 725 m (la courbe en noire), les axes de élément de la route par des courbes colorées avec un numero. Les mesures idéales de l'odomètre et du gyromètre sont simulées à une fréquence de 10 Hz. Les mesures idéales du récepteur GPS sont simulées à une fréquence de 1 Hz. Pour toutes ces données, des bruits gaussiens centrés sont introduits conformément aux caractéristiques données par les constructeurs, afin d'obtenir les observations finales utilisées par le filtre. Pour le GPS, le bruit est caractérisé par la loi normale  $N(0, 1 \text{ m})$ . Pour les données de gyromètre, le bruit est modélisé par d'une processus de marche aléatoire avec un écart type de  $3.5 \text{ deg}/\sqrt{\text{texth}}$ . Enfin, le bruit de l'odomètre suit la loi normale  $N(0, 0.05 \text{ m})$ . Pour tester le filtre dans le cas où le GPS ne marche pas bien, on simule un masque au niveau de la fourche entre l'élément 9 et les éléments (31-32,10) (voire la figure 3).

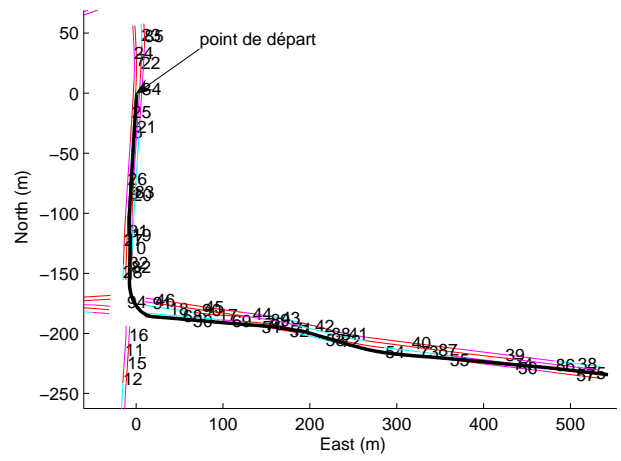


FIGURE 2 – trajectoire de référence du véhicule sur la carte de site CVIS de Berlin

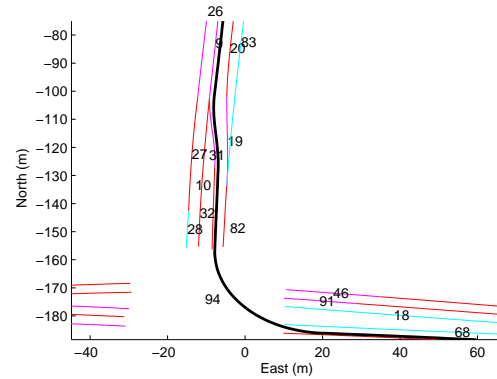


FIGURE 3 – trajectoire de référence du véhicule sur la fourche

Sur la figure 5, on compare l'erreur en distance entre la trajectoire simulée et la trajectoire estimée obtenue avec, d'une part, un système de positionnement traditionnel par EKF (filtre de Kalman étendu) dans lequel on ne prend pas en compte les contraintes cartographiques et, d'autre part, le système proposé dans cet article. On observe que le filtre proposé donne une erreur en distance inférieure à celui de l'EKF, et en particulier pendant le masquage de GPS. En plus, l'erreur moyenne du filtre particulaire est de l'ordre de 0,729 m alors que celui du EKF est de 1,05 m. On peut expliquer ça par le fait que notre modèle d'évolution prend en compte la forme de la route contrairement à EKF qui évolue dans le repère Est-Nord indépendamment de la route. Pour cette simulation, le taux de bonnes détections de l'élément sur lequel le véhicule se trouve est de l'ordre de 69.84% pour le filtre proposé alors que le taux de filtre EKF est de l'ordre de 80%. Par contre, le filtre particulaire donne la probabilité que le véhicule se trouve sur chaque élément de la carte. La figure 4 représente la probabilité que le véhicule se trouve sur chaque élément de la fourche (9,10,31-32).

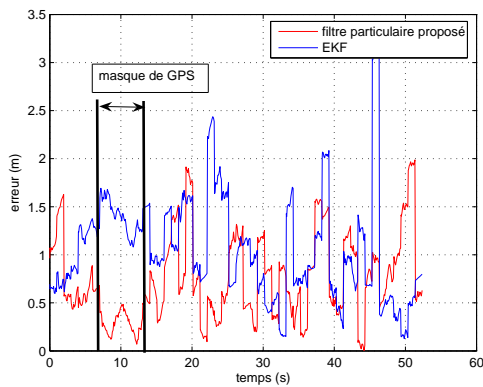


FIGURE 4 – comparaison des erreurs en distance entre trajectoire simulée et trajectoires estimées par EKF et filtre particulaire

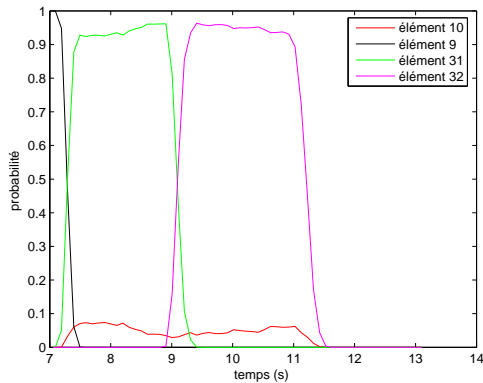


FIGURE 5 – la probabilité de chaque élément de la fourche

## 6 Conclusion et perspectives

La modélisation proposée est fondée sur une représentation par coordonnées de Frenet associées à l'élément sur lequel roule le véhicule. Cette modélisation permet conjointement la localisation et la projection sur la carte dès la phase de filtrage bayésien par approximation particulaire. Les simulations (carte réelle, trajectoire simulée) semblent montrer le bien-fondé de cette approche. Des expérimentations sur trajectoires réelles sont en cours.

La principale perspective est la prise en compte des mesures de pseudo-distances entre le véhicule et les satellites observés (mesures brutes fournies par le GPS) à la place des coordonnées cartésiennes fournies par la solution de navigation GPS.

## Références

[1] P. Bonnifait. *Contribution à la localisation dynamique d'automobiles : application à l'aide à la conduite*. PhD thesis, UTC, 2005.

[2] D. Bétaille and R. Toledo Moreo. Creating Enhanced Maps for Lane Level Vehicle Navigation. *IEEE Journal of Transaction On intelligent Transport Systems*, soumis en 2009.

[3] Jay A. Farrell and M. Barth. *The Global Positioning System and Inertial Navigation : Theory and Practice*. McGraw-Hill, 1998.

[4] C. Fouque et al. Enhancement of Global Vehicle Localization using Navigable Road Maps and Dead-Reckoning. *IEEE/ION PLANS Conference*, 2008.

[5] F. Gustafsson et al. Particle Filters for Positioning, Navigation and Tracking. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 2002.

[6] J. Laneurit. *Perception multisensorielle pour la localisation d'un robot mobile en environnement extérieur, application aux véhicules routiers*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont II, 2006.

[7] A. Mohammed Quddus et al. Current map-matching algorithms for transport applications : State-of-the art and future research directions. *Transportation research. Part C, Emerging technologies*, 2007.

[8] R. Rogers. *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*. AIAA Education Series, 2007.

[9] E. Royer et al. Towards an alternative PS sensor in dense urban environment from visual memory. In *British Machine Vision Conference*.

[10] N. Simond and P. Rives. Trajectory of an Uncalibrated Stereo Rig in Urban Environments. In *IEEE/RSJ Conference*.

[11] A. Soloviev. Tight Coupling of GPS, Laser Scanner, and Inertial Measurements for Navigation in Urban Environments. In *IEEE/ION PLANS Conference*.

[12] R. Toledo Moreo and D. Bétaille. Fusing GNSS, Dead-reckoning and Enhanced Maps for Road Vehicle Lane-Level Navigation . *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, à paraître en 2009.